

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天采区复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析

陈明¹, 王琳玲², 曹柳³, 李名阅¹, 申哲民^{1*}

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430000; 3. 济源产城融合示范区生态环境局, 济源 459000)

摘要: 为探究典型铅锌冶炼城市大气降尘重金属的污染特征和来源解析, 于 2021 年逐月采集河南省某市不同功能区共 22 个点 511 份有效降尘样品, 分析了样品中重金属含量和时空分布特征, 利用地累积指数法和健康风险评价模型评估降尘重金属污染程度, 并采用正定矩阵因子分解模型 (PMF) 定量解析重金属污染源。结果表明, 全市降尘中 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值为 3 185.76、78.18、273.67、149.50、453.60、810.37、54.38 和 2 397.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均高于河南省土壤背景值。各重金属除 Mn 外均具有明显季节变化特征, 其中铅锌冶炼工业区降尘中 Pb、Cd、As 和 Cu 含量显著高于其他功能区; Zn 元素在居民混合区含量最高。地累积指数法结果显示 Cd 和 Pb 的污染最严重, 其次为 Zn、Cu 和 As, 均为严重-偏极度污染。非致癌风险最主要暴露途径是手-口摄食, 各功能区以 Pb 和 As 对儿童造成的非致癌风险最大; Cr、As、Cd 和 Ni 经呼吸途径对人体的致癌风险均低于安全阈值。PMF 模型源解析结果表明, 降尘重金属主要来源为以金属冶炼为主的工业污染源 (39.7%)、交通污染源 (28.9%)、二次扬尘源 (14.4%)、焚烧及燃煤源 (9.3%) 和自然源 (7.8%)。

关键词: 大气降尘; 重金属; 时空分布; 正定矩阵因子分解 (PMF) 模型; 源解析; 铅锌冶炼

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3450-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208046

Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model

CHEN Ming¹, WANG Lin-ling², CAO Liu³, LI Ming-yue¹, SHEN Zhe-min^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China; 3. Environmental Protection Agency of Jiyuan Production City Integration Demonstration Area, Jiyuan 459000, China)

Abstract: To explore the pollution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric deposition in a typical lead-zinc smelting city, 511 effective atmospheric deposition samples from 22 points in different functional areas of a city in Henan Province were collected monthly during 2021. The concentrations and spatial-temporal distribution of heavy metals were analyzed. The geo-accumulation index method and health risk assessment model were utilized to evaluate the heavy metal pollution degree. The sources of heavy metals were quantitatively analyzed using a positive matrix factorization (PMF) model. The results showed that the average concentrations of $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Mn})$, $\omega(\text{Ni})$, and $\omega(\text{Zn})$ in atmospheric deposition samples were 3 185.77, 78.18, 273.67, 149.50, 453.60, 810.37, 54.38, and 2 397.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, which were all higher than the soil background values of Henan Province. All heavy metals except Mn had significant seasonal variation characteristics. The concentrations of Pb, Cd, As, and Cu in the industrial area with lead-zinc smelting were significantly higher than those in other functional areas, and the concentration of Zn was the highest in the residential mixed area. The results of the geo-accumulation index showed that the pollution of Cd and Pb were the most serious, followed by that of Zn, Cu, and As, which belonged to the serious-extreme pollution category. The main exposure route of non-carcinogenic risk was hand-mouth intake. Pb and As posed the greatest non-carcinogenic risk to children in all functional areas. The carcinogenic risks of Cr, As, Cd, and Ni through the respiratory system to humans were all below the threshold values. The analysis of the PMF model showed that the main sources of heavy metals in atmospheric deposition were industrial pollution sources (39.7%), transportation sources (28.9%), secondary dust sources (14.4%), incineration and coal combustion sources (9.3%), and natural sources (7.8%).

Key words: atmospheric deposition; heavy metal; spatial-temporal distribution; PMF model; source apportionment; lead-zinc smelting

大气降尘在地表物质交换过程中发挥着重要的媒介作用, 同时也是多种污染物的载体和反应床, 其中重金属所造成的污染尤为显著^[1,2]。重金属以松散束缚的形式附着在降尘颗粒物表面^[3], 通过重力或降水进入地表环境中, 不仅可以在食物链中传递和累积, 还可以通过呼吸和皮肤接触等方式进入人体, 对生态环境和人体健康造成严重危害^[4,5]。

近年来, 城市降尘重金属污染引起了国内外学者的广泛关注, 主要研究包括重金属污染特征、时

空分布特征、来源解析、生态及健康风险评价等各个方面^[6~9]。有研究表明, 重工业城市排放到大气中的重金属种类多、毒性强和污染源类型复杂^[10], 并且降尘是土壤及水环境中重金属的重要输入源之

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1805201); 河南省南太行地区山水林田湖草生态保护修复试点工程项目

作者简介: 陈明 (1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气重金属污染与防治, E-mail: mingchen16@163.com

* 通信作者, E-mail: zmshen@sjtu.edu.cn

—^[8,9]. 故亟需开展重工业城市大气重金属污染治理工作,其中准确客观地评价污染情况、定量解析降尘重金属的污染来源和贡献率对于大气环境精准防治具有重要意义. 目前,降尘中重金属的源解析方法主要有主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解模型(PMF). 其中 PMF 模型综合考虑数据的不确定性并对分解因子作非负约束,从而量化识别未知源个数和污染源贡献率,具有较强的有效性和现实意义,故已被广泛应用于国内外降尘中重金属来源解析^[11,12],如 Yan 等^[11]利用 PMF 模型对厦门市光电子产业场所降尘中稀土元素进行源解析. 然而我国对降尘重金属的研究主要集中在上海、北京、南京和兰州等大型人口密集城市的主城区^[3,13,14]、城市公园和街道^[15,16]及单一污染源周边^[17]. 对于具有复杂铅锌冶炼等行业的重工业城市而言,探究更多的是冶炼厂周边土壤重金属污染^[18,19],关于其降尘中重金属整体的污染评价和来源解析研究仍较少.

本研究区是河南省某典型铅锌冶炼城市,既有以冶炼和化工为主的重工业集群区,又有人口居住较集中、交通频繁的居民混合区以及以丘陵和山区为主的城郊区^[20],故具有区域划分明显、重金属污染来源更多且更复杂的特点. 本文以全市 2021 年不同功能区逐月降尘重金属为研究对象,利用反距离权重法分析重金属的空间分布,采用地累积指数法

和健康风险评价模型进行污染水平和健康风险评估,并通过相关性分析和 PMF 模型等方法定量解析来源贡献率,以期为该市及全国铅锌冶炼城市大气重金属污染治理方向提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

研究区地处河南省西北部的某个城市,北依太行山,南隔黄河,属暖温带大陆性季风气候,主导风向为东风,年平均温度为 14.6℃,年平均降雨量为 567.9 mm. 该市经济产业以铅锌和钢材冶炼为主,是我国最大的铅锌冶炼基地^[6].

本研究综合考虑研究区域地形特征和工业分布情况,采用以均匀布点法为主,兼顾主导风向和不同功能区差异,共布设了 22 处采样点(图 1),分别为工业区(10 处)、居民混合区(7 处)和城郊区(5 处). 各采样点布置 2 个降尘缸以进行平行监测,于 2021 年 1~12 月间逐月进行采集. 采样点设置在降尘缸不易被损坏且易于采样者更换的地方,附近无高大建筑物及局部污染源,降尘缸放置高度应距离地面 5~12 m. 参考国家标准《环境空气 降尘的测定 重量法》(GB/T 15265-1994),用降尘缸(直径 15 cm,高度 30 cm,内壁光滑的聚乙烯塑料桶,加入 60 mL 乙二醇溶液)收集干湿降尘,采样时将降尘收集液转移至塑封袋进行密封保存. 样品寄回实验室

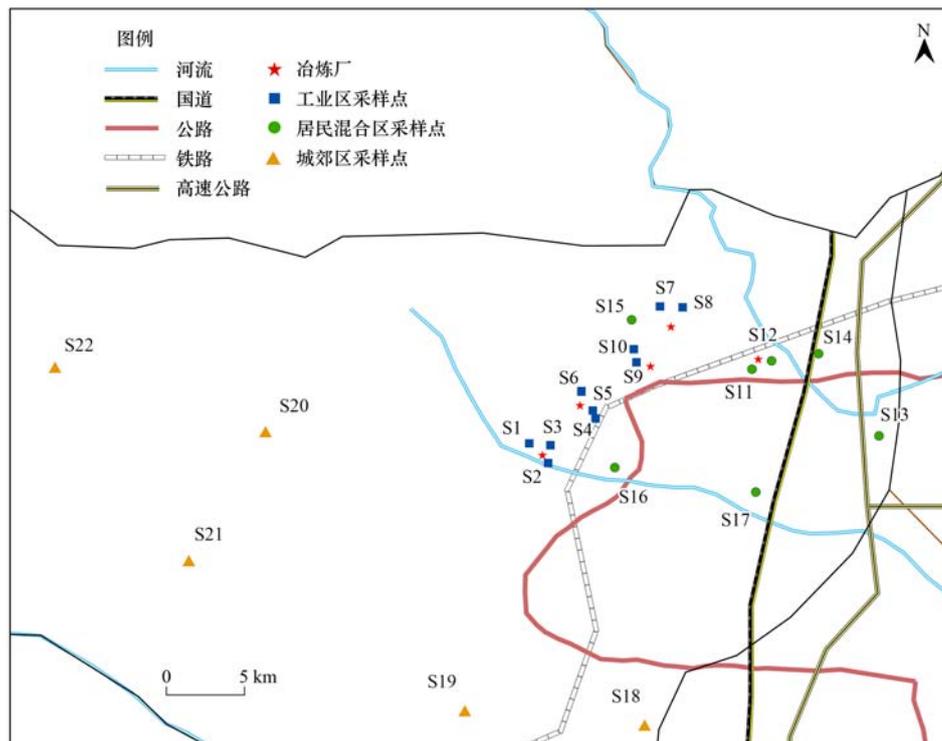


图 1 河南省某市采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in a city of Henan Province

后借助镊子、尼龙筛剔除树叶和昆虫等异物,并用蒸馏水冲刷塑料袋及异物上残留降尘,将收集液蒸干得到降尘样品,研磨后装入密封袋保存。

1.2 样品测定方法

降尘中重金属全量采用硝酸-王水法(硝酸:盐酸 = 1:3)消解。称取制备好的样品0.100 0 g于聚四氟乙烯消解管中,加入 2 mL 浓硝酸(优级纯)和 6 mL 浓盐酸(优级纯)后置于电热板消解仪中,消解温度控制在 150℃ 以内。消解后的溶液用 3% 稀硝酸定容至 25 mL 容量瓶,并经过 0.45 μm 水系滤头过滤后采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 5110)测定消解液中重金属 Pb、Cd、As、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Zn 全量。

每批次样品测定过程中均进行一次空白实验和重复样测定,空白样品与实验样品处理过程完全一致,各元素实验测定值均减去空白样含量,重复样两次测量结果的相对标准偏差均低于 5%。所测元素标准曲线相关性系数 R^2 均大于 0.995,并使用国家标准土样 GBW 07427(GSS-13)同步进行测定,作为质量监控,误差范围控制在 85%~107%。

1.3 地积累指数法

地积累指数法(geo-accumulation index)定量地评价了土壤、沉积物和大气降尘中重金属的污染程度,它综合考虑了自然岩层运动引起的土壤背景值变化和人为因素造成的影响^[21]。其计算公式如下^[22]：

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/1.5B_i) \quad (1)$$

式中, C_i 为大气降尘中重金属元素 i 的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B_i 为元素 i 的土壤环境背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。地积累指数法将污染程度分为 7 个等级: $I_{\text{geo}} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$, 轻度污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$, 中度污染; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$, 偏严重污染; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$, 严重污染; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$, 偏极度污染; $5 < I_{\text{geo}}$, 极度污染。

1.4 健康风险评价模型

1.4.1 暴露量

本研究采用美国环保署(US EPA)开发的健康风险评价模型,来计算潜在有毒重金属经手-口、呼吸和皮肤接触 3 种途径下的日均暴露剂量并进行健康风险评价(非致癌风险和致癌风险),计算公式如下^[23]：

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = C \times \frac{\text{IngR} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = C \times \frac{\text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = C \times \frac{\text{SA} \times \text{CF} \times \text{AF} \times \text{ABF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

$$\text{LADD}_{\text{inh}} = \left(\frac{\text{EF}_{\text{child}} \times \text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{EF}_{\text{adult}} \times \text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \times \frac{C}{\text{PEF} \times \text{AT}} \quad (5)$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 $\text{ADD}_{\text{dermal}}$ 分别为经手-口、呼吸和皮肤接触这 3 种途径下日均重金属摄入量, LADD_{inh} 为呼吸途径下致癌重金属终生日均暴露量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; 其余参数见表 1。

表 1 重金属日均暴露量模型参数含义及取值

Table 1 Parameters for average daily exposure dose model of heavy metals

参数	含义	单位	取值		文献
			成人	儿童	
C	重金属含量	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			本研究
EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	350	320	[24]
ED	暴露年限	a	24	6	[25]
BW	平均体重	kg	58.6	15.9	[24,26]
AT	平均暴露时间	d	365 × ED (非致癌) 365 × 70 (致癌)		[27]
CF	单位转换	$\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$	1×10^{-6}	1×10^{-6}	[24]
IngR	摄食降尘速率	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	100	200	[25]
InhR	呼吸速率	$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	12.8	7.63	[24]
PEF	颗粒物排放因子	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	1.36×10^9	1.36×10^9	[23]
SA	暴露皮肤面积	cm^2	2 145	1 150	[24]
AF	皮肤黏着度	$\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.07	0.2	[23]
ABF	皮肤吸收因子	无量纲	0.001	0.001	[23]

1.4.2 健康风险表征

依据模型,降尘中重金属 Pb、Cd、As、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Zn 均具有慢性非致癌风险,且 Cd、As、Cr 和 Ni 同时具有致癌风险,由于 EPA 只提供了经

呼吸途径致癌暴露量参考值,故只考虑致癌重金属经呼吸途径的致癌风险。重金属非致癌风险及致癌风险计算公式如下^[23]：

$$\text{HQ}_i = \text{ADD}_i/\text{RfD}_i \quad (6)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (7)$$

$$RI = LADD_{inh} \times SF_{inh} \quad (8)$$

$$TCR = \sum RI_i \quad (9)$$

式中, HQ_i 为重金属 i 的非致癌风险值, HI 为单项重

金属所有暴露途径下的非致癌风险值, RI 为致癌重金属在呼吸暴露途径下的致癌风险值, TCR 为所有致癌重金属的总致癌风险值, RfD_i 为重金属元素 i 摄入的参考剂量, SF_{inh} 为致癌斜率因子. RfD_i 和 SF_{inh} 取值见表 2.

表 2 重金属的参考剂量和致癌斜率因子¹⁾

Table 2 Reference doses and carcinogenic slope factors of heavy metals

项目	单位	Pb	Cd	As	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
RfD_{ing}	$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	3.50×10^{-3}	1.00×10^{-3}	3.00×10^{-4}	3.00×10^{-3}	4.00×10^{-2}	4.60×10^{-2}	2.00×10^{-2}	0.30
RfD_{inh}	$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	3.52×10^{-3}	1.00×10^{-3}	3.00×10^{-4}	2.86×10^{-5}	4.02×10^{-2}	1.43×10^{-5}	2.06×10^{-2}	0.30
RfD_{dermal}	$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	5.20×10^{-4}	1.00×10^{-5}	1.23×10^{-4}	6.00×10^{-5}	1.20×10^{-2}	1.84×10^{-3}	5.40×10^{-3}	0.06
SF_{inh}	$(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$	—	6.30	15.10	42.00	—	—	0.84	—

1) “—”表示缺少数据

当 HQ_i 或 $HI < 1$ 时表示非致癌风险较小, 可以忽略; 当 HQ_i 或 $HI \geq 1$ 时表示有非致癌风险, 值越大风险越大. 当 RI 或 $TCR < 10^{-6}$ 时表示致癌风险较小, 可以忽略; 当 RI 或 TCR 介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 时, 致癌风险在可接受范围内; 当 RI 或 $TCR \geq 10^{-4}$ 时, 表示有致癌风险.

1.5 正定矩阵因子分解模型

正定矩阵因子分解模型 (PMF) 是 1993 年由芬兰的 Paatero 等^[28] 提出的以受体模型为基础并利用样本组成对污染源进行定量化解析的一种数学方法. 该模型将样品重金属浓度矩阵 (X_{ij}) 分解成污染源贡献因子矩阵 (G_{ik})、污染源成分谱因子矩阵 (F_{kj}) 和残差矩阵 (E_{ij}), 通过求解结果定量识别各污染源的贡献率, 具体方程如下^[29,30]:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} + E_{ij} \quad (10)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个重金属元素的含量; G_{ik} 为第 k 个源对第 i 个样品的贡献; F_{kj} 为第 k 个源中第 j 个重金属元素的含量; E_{ij} 为残差矩阵.

PMF 模型通过最小二乘法经多次迭代运算得到最小化的目标函数 Q , 从而得到最优的因子矩阵和源剖面, 目标函数 Q 的定义如下^[29]:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj}}{U_{ij}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)^2 \quad (11)$$

式中, U_{ij} 为第 i 个样品第 j 个元素的不确定度, 计算方法如下^[30]:

$$U_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times MDL, & (C \leq MDL) \\ \sqrt{(C \times RSD)^2 + \left(\frac{MDL}{2}\right)^2}, & (C > MDL) \end{cases} \quad (12)$$

式中, MDL 为方法检出限, C 为重金属元素含量, $mg \cdot kg^{-1}$; RSD 为相对标准偏差.

1.6 数据处理方法

降尘重金属实测数据通过 Excel 2016 和 SPSS 26 软件统计分析, 利用 ArcGIS 10.2、Surfer 16.0 和 Origin pro 2021 进行绘图分析, 采用 EPA PMF 5.0 软件进行降尘重金属源解析.

2 结果与讨论

2.1 降尘重金属含量特征

全市 2021 年不同功能区大气降尘重金属含量统计结果见表 3. 降尘中各重金属含量平均值排序依次为: $Pb (3\ 185.76\ mg \cdot kg^{-1}) > Zn (2\ 397.38\ mg \cdot kg^{-1}) > Mn (810.37\ mg \cdot kg^{-1}) > Cu (453.60\ mg \cdot kg^{-1}) > As (273.67\ mg \cdot kg^{-1}) > Cr (149.50\ mg \cdot kg^{-1}) > Cd (78.18\ mg \cdot kg^{-1}) > Ni (54.38\ mg \cdot kg^{-1})$, 分别是河南省土壤背景值的 146.13、38.36、1.45、22.68、27.93、2.36、1 221.56 和 1.99 倍. 其中 Pb 、 Cd 、 As 、 Cu 和 Zn 含量也远高于国家土壤环境质量风险筛选值^[31], 说明这 5 种重金属受人为污染较严重, 在大气中富集程度较高, 这与 Xing 等^[20] 研究的结果相一致. 有研究表明, 元素变异系数大小反映了其空间分布离散程度和受外界因素干扰程度^[32,33]. 总体而言, 在不同功能区中大部分重金属含量高低依次为: 工业区 > 居民混合区 > 城郊区 (Cr 和 Zn 略有不同), 说明大气重金属含量受工业污染影响较大. 各重金属变异系数排序为: $As > Pb > Cd > Cu > 90\% > Zn > 40\% > Mn > Cr > Ni$. 其中, As 、 Pb 、 Cd 和 Cu 的变异系数均大于 90%, Zn 的变异系数大于 40%, 表明这 5 种元素属于高度变异, 在空间分布不均匀, 受外界干扰大; 而 Mn 、 Cr 、 Ni 变异系数较小, 空间分布差异较小.

表 3 不同功能区降尘重金属含量统计结果¹⁾

Table 3 Statistics of heavy metal concentrations of atmospheric deposition in different functional areas

功能区	项目	Pb	Cd	As	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
工业区	平均值	6 535.26	157.79	559.45	169.55	926.01	926.94	58.28	2 133.81
	标准差	3 604.50	95.46	322.30	83.67	482.59	260.52	34.80	763.69
	最大值	17 395.14	540.33	1 707.38	521.23	2 427.79	1 855.27	259.82	6 104.01
	最小值	1 037.59	24.91	116.27	45.87	243.22	542.05	24.88	831.20
居民混合区	平均值	2 222.38	63.12	209.15	137.38	326.76	877.88	52.47	3 701.25
	标准差	1 698.73	56.64	186.75	68.05	232.44	306.91	48.95	3 543.67
	最大值	8 028.50	429.10	1 194.03	368.17	1 212.12	1 894.30	341.53	17 673.71
	最小值	243.68	6.02	24.07	33.90	51.14	319.92	22.93	475.20
城郊区	平均值	799.66	13.63	52.40	141.56	108.03	626.27	52.38	1 357.09
	标准差	1 532.60	11.85	23.20	117.54	46.01	164.32	42.45	1 798.79
	最大值	11 702.94	71.43	122.30	817.65	317.65	1 043.61	273.53	8 871.43
	最小值	55.44	2.63	10.56	42.24	46.63	218.00	17.63	356.39
全市平均值		3 185.76	78.18	273.67	149.50	453.60	810.37	54.38	2 397.38
变异系数		93.75	93.70	94.86	11.70	93.36	19.91	6.22	49.81
土壤环境质量风险筛选值 ^[31]		170.00	0.60	25.00	250.00	100.00	—	190.00	300.00
河南省土壤背景值 ^[34]		21.80	0.064	9.80	63.30	20.00	560.00	27.30	62.50

1) 变异系数单位为%,其余单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; “—”表示缺少数据

2.2 降尘重金属时空分布特征

基于上述研究区降尘重金属含量的实测结果,从不同季节分析各重金属含量的时间变化特征.如图 2 所示,降尘重金属除 Mn 不具有明显的季节特征外,其余重金属均具有明显的季节变化趋势.其中 Pb、As、Cr、Cu 和 Zn 均呈现出秋季最高,夏冬次之,春季最小的趋势,说明这几种元素之间具有同源的可能性;Cd 则表现为秋冬季节最高,春夏次之的特征;而 Ni 则显著表现为夏季最高,其次是秋季,春冬季最小的分布特征,且夏季在居民混合区最高,这可能与暴露在高温天气下含 Ni 合金部件的磨损有关^[35].总体而言,重金属元素变化趋势与污染物排放的季节性特征和气候条件有较大关系.

利用 Surfer 16.0 软件对研究区降尘重金属含量进行反距离权重法空间插值分析,如图 3 所示.结合空间变异系数可知,总体上降尘中 Pb、Cd、As、Cu 和 Zn 这 5 种重金属空间分布差异明显(表 3),受外来污染源的影响较大^[10].其中,重金属 Pb、Cd、As 和 Cu 的高值区均出现在以有色金属冶炼厂较为集中的工业区,可能与铅锌冶炼、钢铁加工等当地支柱产业的排污影响有关;同时 Pb、As 和 Cu 污染的范围更大,Cd 相对集中,但均无主要延伸方向.重金属 Zn 在东部居民混合区的浓度明显高于其他区降尘中的浓度,可能受距离较近的锌冶炼厂影响导致;且该区域内道路交通密集,车辆运输活动频繁,故交通污染源也会有一定贡献^[36].重金属 Mn、Cr 和 Ni 总体上空间分布差异较小,高值区主要分布在全市东中部的个别地区,污染范围也相对较小,部分浓度稍高点位可能受一定重工业加工影响所导致.

2.3 降尘重金属污染评价

2.3.1 地累积指数评价

如图 4 所示,全市整体降尘中重金属地累积指数平均值大小排序为: Cd(9.13) > Pb(6.31) > Zn(4.52) > Cu(3.69) > As(3.65) > Cr(0.64) > Ni(0.44) > Mn(-0.04).根据地累积指数污染等级标准可知^[21],Cd 和 Pb 均属于极度污染,Zn 属于偏极度污染,Cu 和 As 属于严重污染,Cr 和 Ni 均介于轻度污染,Mn 属于未污染.

对于 Cd 而言,全部采样点 Cd 的地累积指数均属于极度污染.其中,工业区(10.34)污染远大于居民混合区(8.98)和城郊区(6.90),表明该市涉重企业长期生产所造成 Cd 污染的严重性和普遍性.对于 Pb 而言,72.73%的采样点 Pb 地累积指数属于极度污染,22.73%属于偏极度污染,4.54%属于严重污染;其中工业区(7.54)和居民混合区(5.87)属于极度污染,城郊区(4.48)属于偏极度污染.重金属 Zn 在居民混合区(4.89)污染略大于工业区(4.70),均属于偏极度污染,该结果与重金属含量分析相一致,城郊区(3.65)属于严重污染.对于 Cu 和 As 而言,工业区(Cu:4.91; As:4.91)均为偏极度污染,居民混合区(Cu:3.26; As:3.32)均为严重污染,城郊区(Cu:1.87; As:1.60)均为中度污染,说明 Cu 和 As 在各功能区间污染差异类似,污染源主要来自工业活动且集中在工业区.对于其他重金属,工业区(Cr:0.79; Ni:0.53; Mn:0.11)、居民混合区(Cr:0.51; Ni:0.36; Mn:0.02)和城郊区(Cr:0.53; Ni:0.37)均为轻度污染;并且城郊区 Mn 地累积指数为-0.43,属于未污染.整体上,研究

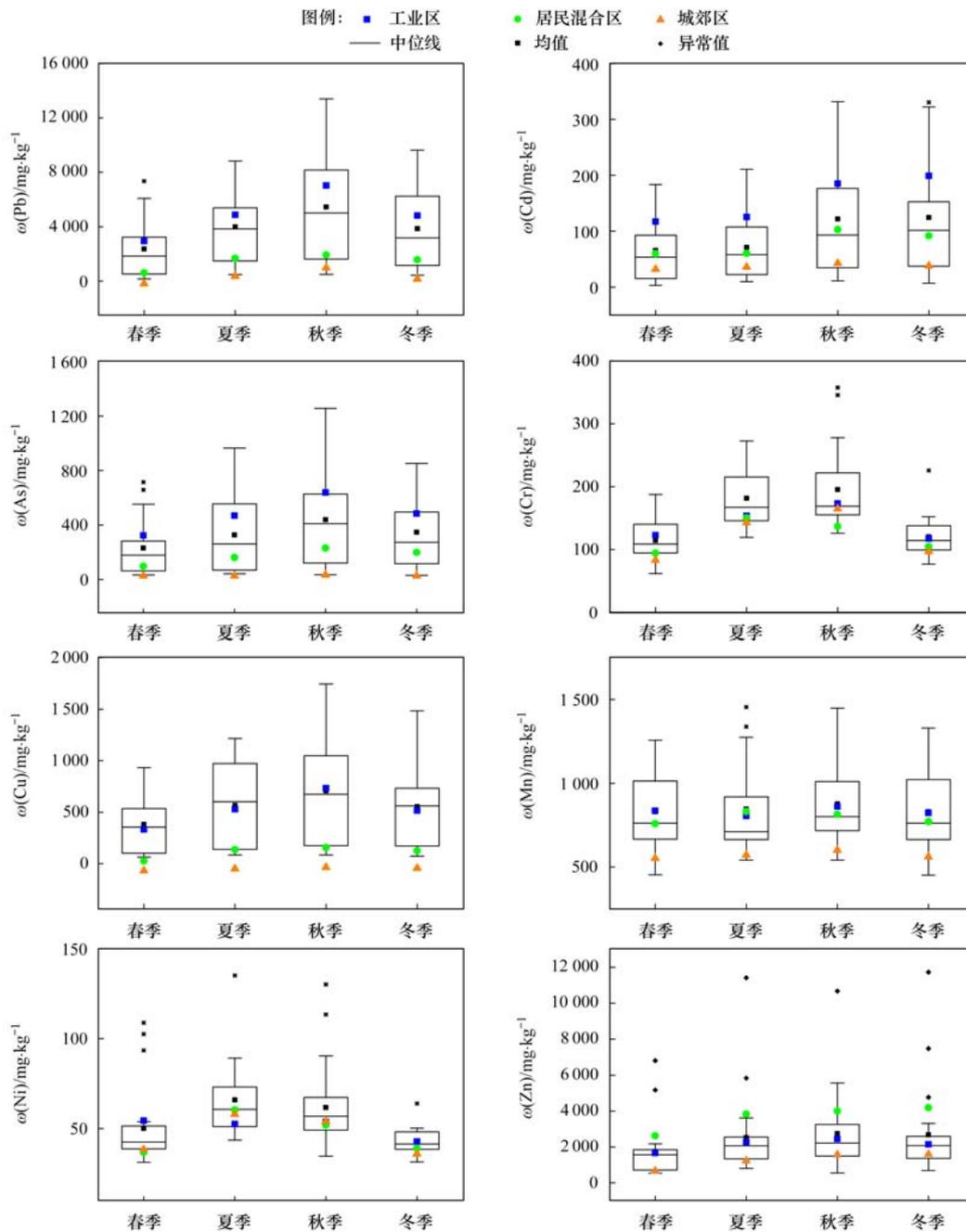


图 2 大气降尘重金属时间分布特征

Fig. 2 Temporal distribution characteristics of heavy metals in atmospheric deposition

地各功能区中重金属地累积指数平均值排序为: 工业区 > 居民混合区 > 城郊区。

2.3.2 健康风险评价

不同功能区降尘重金属经不同暴露途径下对成人和儿童的非致癌风险商(HQ)和总非致癌风险指数(HI)如表4所示。各重金属经3种途径进入人体造成的非致癌风险商(HQ)均呈现儿童 > 成人的特征。其中, 重金属经手-口摄食途径对人体的非致癌风险(HQ)最高, 儿童和成人在各功能区经该途径的非致癌风险(HQ)占总风险(HI)的97.5%(成人)~99.2%(儿童), 其次是皮肤接触途径和呼吸吸入途径, 这与国内外多数地区研究结论相

似^[2,8,13,21,23]。无论对于儿童或成人, 重金属经手-口摄食途径下, 在工业区和城郊区的非致癌风险商(HQ)最大元素是Pb, 在居民混合区是As; 经皮肤接触途径下, 在工业区和居民混合区的非致癌风险商(HQ)最大元素是Cd, 在城郊区是Cr; 而经呼吸吸入途径下, 在所有功能区的非致癌风险商(HQ)最大元素均是Mn。但8种重金属中, 只有经手-口摄食接触Pb、Cd和As的单项非致癌风险商(HQ)大于1, 具有非致癌风险, 其余均不存在非致癌风险。各重金属对成人和儿童的总非致癌风险指数(HI)顺序为: 工业区 Pb > As > 1 > Cd > Cr > Mn > Cu > Zn > Ni(成人), Pb > As > Cd > 1 > Cr > Cu > Mn > Zn >

Ni(儿童); 居民混合区 $As > Pb > 1 > Cd > Cr > Mn > Zn > Cu > Ni(成人)$; 城郊区 $1 > Pb > As > Cr > Mn > Cd > Zn > Cu > Ni(成人)$, $Pb > As > 1 > Cr > Mn > Cd > Zn > Cu > Ni(儿童)$. 由此可知,各重金属对

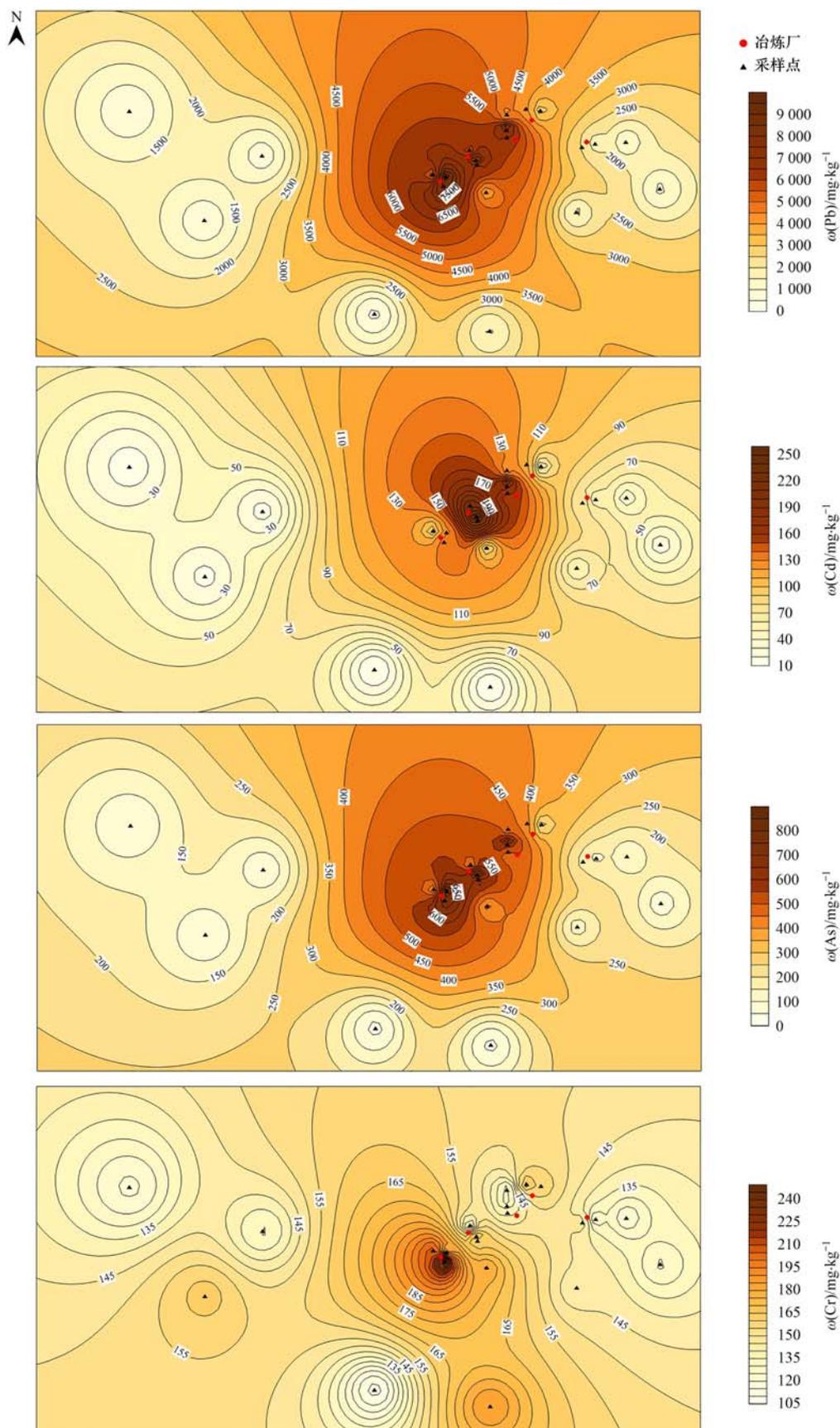
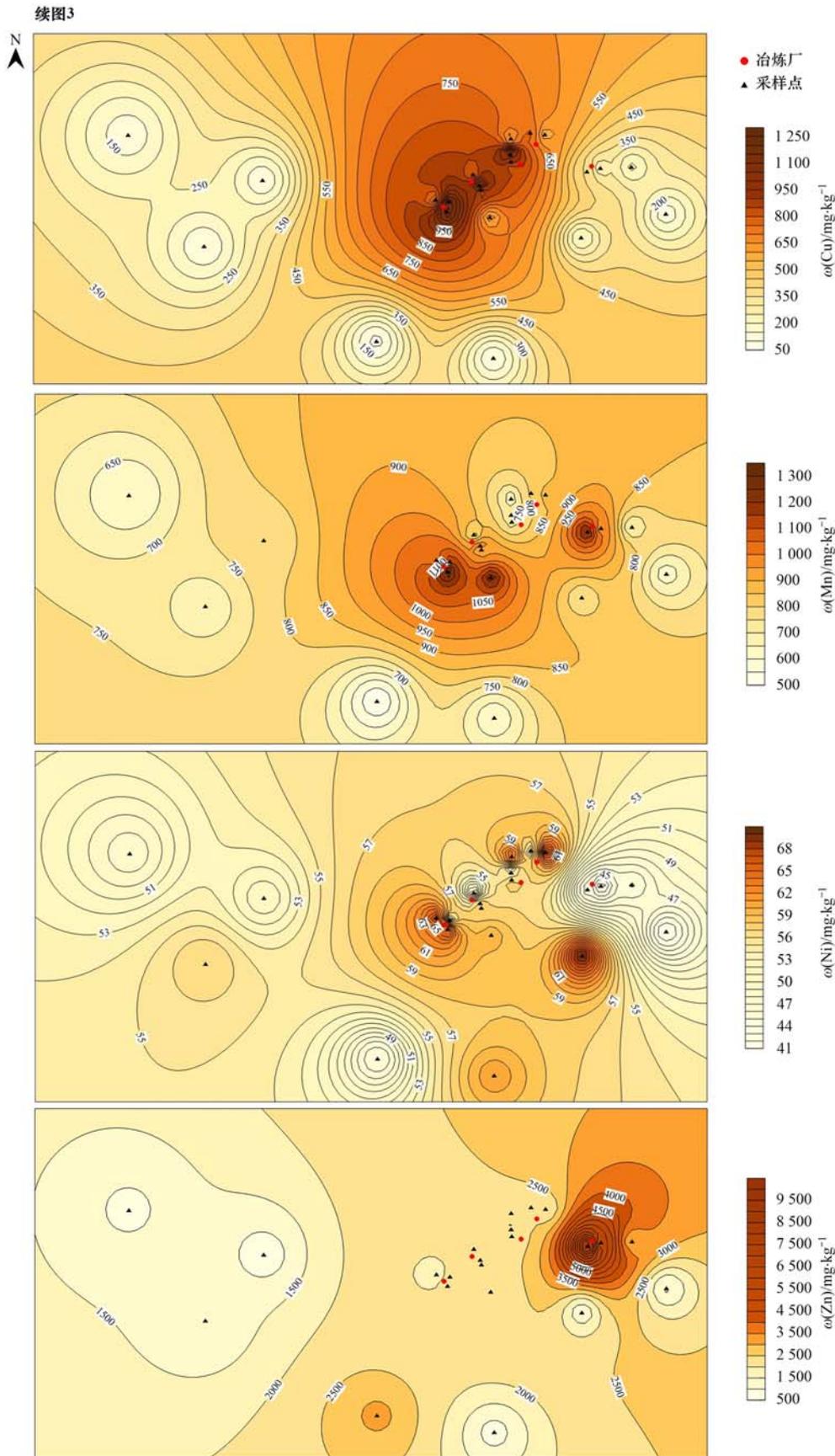


图 3 大气降尘重金属空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of heavy metals in atmospheric deposition



儿童存在更大程度的非致癌健康风险. 其中 Pb(HI: 2. 53 ~ 20. 64) 和 As(HI: 1. 93 ~ 20. 62) 元素对儿童的暴露总叠加风险指数在各功能区均大于 1, Cd 元素仅在工业区存在非致癌健康风险(HI: 1. 94), 说

明这些元素在大气中污染严重, 会对儿童造成极大的潜在健康危害. 尤其这 3 种重金属作为有毒重金属, 长期暴露在此环境中会引发神经系统、内分泌系统以及呼吸系统等各方面的疾病, 需加强防范和

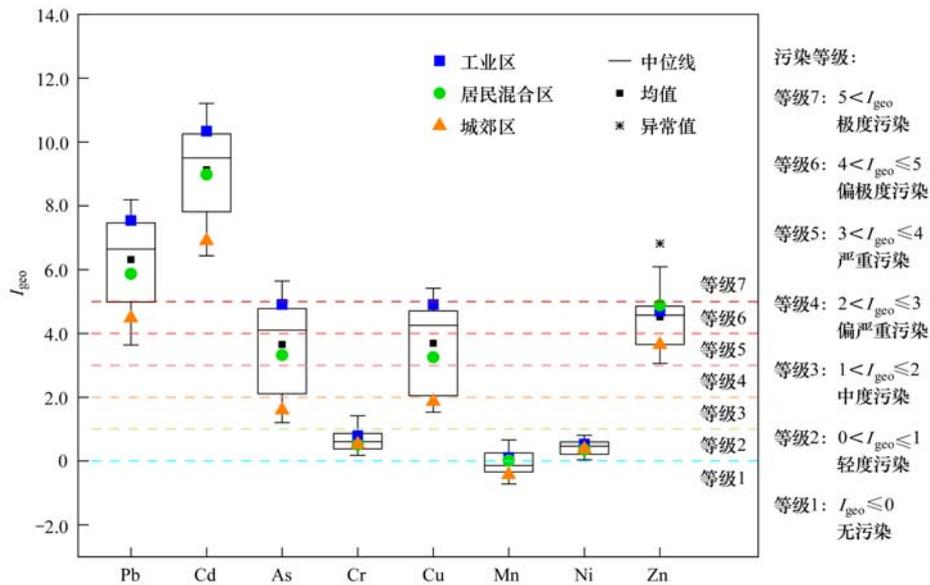


图 4 降尘中重金属的 I_{geo} 值

Fig. 4 Geo-accumulation index values of heavy metals in atmospheric deposition

表 4 不同功能区不同暴露途径降尘重金属非致癌风险

Table 4 Non-carcinogenic risk of heavy metals to human health under various exposure approaches in atmospheric deposition from different functional areas

功能区	元素	成人				儿童			
		HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{dermal}	HI	HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{dermal}	HI
工业区	Pb	3.06	2.86×10^{-4}	8.73×10^{-3}	3.06	20.59	5.74×10^{-4}	4.50×10^{-2}	20.64
	Cd	2.58×10^{-1}	2.43×10^{-5}	3.88×10^{-2}	2.97×10^{-1}	1.74	4.88×10^{-5}	2.00×10^{-1}	1.94
	As	3.05	2.87×10^{-4}	1.12×10^{-2}	3.06	20.57	5.77×10^{-4}	5.77×10^{-2}	20.62
	Cr	9.25×10^{-2}	9.13×10^{-4}	6.94×10^{-3}	1.00×10^{-1}	6.23×10^{-1}	1.83×10^{-3}	3.58×10^{-2}	6.61×10^{-1}
	Cu	3.79×10^{-2}	3.55×10^{-6}	1.90×10^{-4}	3.81×10^{-2}	2.55×10^{-1}	7.13×10^{-6}	9.79×10^{-4}	2.56×10^{-1}
	Mn	3.30×10^{-2}	9.98×10^{-3}	1.24×10^{-3}	4.42×10^{-2}	2.22×10^{-1}	2.01×10^{-2}	6.39×10^{-3}	2.49×10^{-1}
	Ni	4.77×10^{-3}	4.36×10^{-7}	2.65×10^{-5}	4.80×10^{-3}	3.21×10^{-2}	8.75×10^{-7}	1.37×10^{-4}	3.23×10^{-2}
	Zn	1.16×10^{-2}	1.10×10^{-6}	8.74×10^{-5}	1.17×10^{-2}	7.84×10^{-2}	2.20×10^{-6}	4.51×10^{-4}	7.89×10^{-2}
居民混合区	Pb	1.04	9.78×10^{-5}	2.97×10^{-3}	1.04	7.00	1.96×10^{-4}	1.53×10^{-2}	7.02
	Cd	1.03×10^{-1}	9.72×10^{-6}	1.55×10^{-2}	1.19×10^{-1}	6.96×10^{-1}	1.95×10^{-5}	8.00×10^{-2}	7.76×10^{-1}
	As	1.14	1.07×10^{-4}	4.18×10^{-3}	1.15	7.69	2.16×10^{-4}	2.16×10^{-2}	7.71
	Cr	7.49×10^{-2}	7.40×10^{-4}	5.63×10^{-3}	8.13×10^{-2}	5.05×10^{-1}	1.49×10^{-3}	2.90×10^{-2}	5.36×10^{-1}
	Cu	1.34×10^{-2}	1.25×10^{-6}	6.69×10^{-5}	1.34×10^{-2}	9.01×10^{-2}	2.51×10^{-6}	3.45×10^{-4}	9.04×10^{-2}
	Mn	3.12×10^{-2}	9.45×10^{-3}	1.17×10^{-3}	4.19×10^{-2}	2.10×10^{-1}	1.90×10^{-2}	6.05×10^{-3}	2.36×10^{-1}
	Ni	4.29×10^{-3}	3.92×10^{-7}	2.39×10^{-5}	4.32×10^{-3}	2.89×10^{-2}	7.88×10^{-7}	1.23×10^{-4}	2.91×10^{-2}
	Zn	2.02×10^{-2}	1.90×10^{-6}	1.52×10^{-4}	2.03×10^{-2}	1.36×10^{-1}	3.82×10^{-6}	7.82×10^{-4}	1.37×10^{-1}
城郊区	Pb	3.74×10^{-1}	3.52×10^{-5}	1.07×10^{-3}	3.75×10^{-1}	2.52	7.07×10^{-5}	5.51×10^{-3}	2.53
	Cd	2.23×10^{-2}	2.10×10^{-6}	3.35×10^{-3}	2.57×10^{-2}	1.50×10^{-1}	4.22×10^{-6}	1.73×10^{-2}	1.68×10^{-1}
	As	2.86×10^{-1}	2.69×10^{-5}	1.05×10^{-3}	2.87×10^{-1}	1.92	5.40×10^{-5}	5.40×10^{-3}	1.93
	Cr	7.72×10^{-2}	7.62×10^{-4}	5.80×10^{-3}	8.38×10^{-2}	5.20×10^{-1}	1.53×10^{-3}	2.99×10^{-2}	5.52×10^{-1}
	Cu	4.42×10^{-3}	4.14×10^{-7}	2.21×10^{-5}	4.44×10^{-3}	2.98×10^{-2}	8.31×10^{-7}	1.14×10^{-4}	2.99×10^{-2}
	Mn	2.23×10^{-2}	6.74×10^{-3}	8.36×10^{-4}	2.99×10^{-2}	1.50×10^{-1}	1.35×10^{-2}	4.32×10^{-3}	1.68×10^{-1}
	Ni	4.29×10^{-3}	3.92×10^{-7}	2.38×10^{-5}	4.31×10^{-3}	2.89×10^{-2}	7.87×10^{-7}	1.23×10^{-4}	2.90×10^{-2}
	Zn	7.40×10^{-3}	6.97×10^{-7}	5.56×10^{-5}	7.46×10^{-3}	4.99×10^{-2}	1.40×10^{-6}	2.87×10^{-4}	5.02×10^{-2}

治理^[2,3,16]. 其他重金属元素虽然总非致癌风险指数 (HI) 在各功能区中均未超过 1, 非致癌风险较小, 但类似于 Cr 亦是造成健康风险的主要污染物, 故也应长期重视, 加强管控.

该市不同功能区 4 种致癌重金属经呼吸途径人体的暴露致癌风险计算结果如表 5 所示. 可以得出,

重金属在不同功能区对人体的致癌风险排序为: As > Cr > Cd > Ni (工业区), Cr > As > Cd > Ni (居民混合区). 但各功能区重金属的单项致癌风险均未超过风险阈值 10^{-6} , 总致癌风险 (TCR) 介于 $5.51 \times 10^{-7} \sim 1.33 \times 10^{-6}$, 均在美国环保署推荐的可接受风险阈值范围 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 内, 故可认为在该市内

经呼吸摄入的降尘重金属对人体尚不存在致癌风险. 国内外多数研究也普遍认为 Cd、As、Cr 和 Ni 经呼吸途径的致癌风险均在可接受范围内^[2,3,13,16,21].

表 5 不同功能区降尘重金属致癌风险指数 (RI)

Table 5 Carcinogenic health risk (RI) of heavy metals in atmospheric deposition from different functional areas

元素	工业区	居民混合区	城郊区
Cd	7.88×10^{-8}	3.15×10^{-8}	6.81×10^{-9}
As	6.70×10^{-7}	2.51×10^{-7}	6.28×10^{-8}
Cr	5.65×10^{-7}	4.58×10^{-7}	4.72×10^{-7}
Ni	1.13×10^{-8}	9.15×10^{-9}	9.43×10^{-9}
TCR	1.33×10^{-6}	7.49×10^{-7}	5.51×10^{-7}

2.4 降尘重金属来源解析

2.4.1 重金属相关性分析

相关性分析对于研究重金属来源解析具有重要意义, 呈显著相关性的元素之间来源相同的可能性较大或是复合污染^[23,37]. 本研究通过对降尘中各重金属含量进行相关性分析 (图 5), 可知该市降尘重金属 Pb-Cd ($r=0.85$), Pb-As ($r=0.98$), Pb-Cu ($r=0.98$), Pb-Mn ($r=0.54$), Cd-As ($r=0.86$), Cd-Cu ($r=0.86$), As-Cu ($r=0.98$), Cr-Mn ($r=0.68$), Cr-Ni ($r=0.63$) 和 Cu-Mn ($r=0.54$) 元素之间均在 $P < 0.01$ 水平上呈现极显著相关, 其中 Pb 与 Cd、As、Cu、Mn 具有较强相关性, 说明这 5 种重金属元素与人为活动污染源密切相关, 是复合污染 (工业冶炼活动、交通污染源和自然源等) 的可能性较大^[38]. 其中 Zn 与大多数重金属元素之间都不相关, 说明 Zn 可能与其他重金属来源不同.

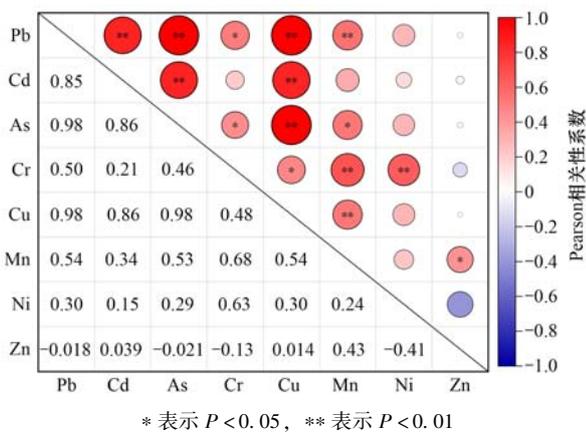


图 5 重金属元素间的相关性系数

Fig. 5 Correlation coefficient between heavy metal elements

2.4.2 正定矩阵因子分解模型

本研究采用正定矩阵因子分解模型 (PMF) 对该市降尘重金属进行污染源解析. 将实验数据导入 EPA PMF 5.0 软件后, 8 种重金属的信噪比 (S/N) 均大于 1, 被归类为“Strong”, 并依次设置 3~6 个因

子数分别进行运算. 当因子数为 5 时 $Q_{\text{robust}}/Q_{\text{true}}$ 处于快速下降处且样本的大部分残差在 $-3 \sim 3$ 之间, 除 Ni 的拟合曲线 r^2 小于 0.5 外, 其余重金属的拟合曲线 r^2 均大于 0.9, 说明 PMF 模型的源解析结果较好^[39], 所选因子数能较好解释实测情况.

PMF 软件的运行结果如图 6 所示. 从中可知, 因子 1 主要负载元素为 Cd, 贡献率为 65.5%, 其次为 As, 贡献率为 17.0%. Cd 和 As 通常被认为是市政焚烧、燃煤的标志元素^[39,40]. 结合实际调研, 研究区在金属冶炼及冬季取暖时均会以燃煤作为重要供给能源. 故可将因子 1 作为焚烧及燃煤源. 在因子 2 中, Mn、Ni 和 Cr 的贡献率最大, 分别为 58.6%、43.5% 和 34.3%. 相关研究已证实这 3 种元素可能来源于自然背景, 在成土过程和土壤母质中均广泛存在^[41,42]. 并且 Mn、Ni 和 Cr 的变异系数较小 (表 3), 受人为活动影响较小, 故因子 2 可以代表自然源. Zn 可以作为因子 3 的标识元素, 贡献率高达 87.1%. Zn 元素是轮胎硬化剂和沥青的重要成分, 被广泛应用于轮胎的制作生产中^[42]. 同时, Zn 在居民混合区的城中心富集较高, 富集程度随着距市中心距离的增加而明显减少 (图 3); 且主城区中心交通干道多, 有贯穿全市的国道、铁路和公路, 车流量大, 故轮胎的磨损、润滑油的使用和汽车尾气排放均可能是降尘中 Zn 元素的主要来源^[36,43]. 所以, 因子 3 可以解释为交通污染源. 因子 4 主要贡献元素是 Pb、As 和 Cu, 贡献率分别为 64.9%、66.6% 和 66.0%, 对 Cd 也有一定贡献率 (21.0%). 结合上述 I_{geo} 值和相关性分析, 这几种元素受人类活动影响较大且具有显著相关性, 说明来源存在一致性. 此外, Pb、As、Cu 和 Cd 污染主要集中在金属冶炼工业区 (图 3), 在铅铜冶炼及加工过程中, 高温下产生的混

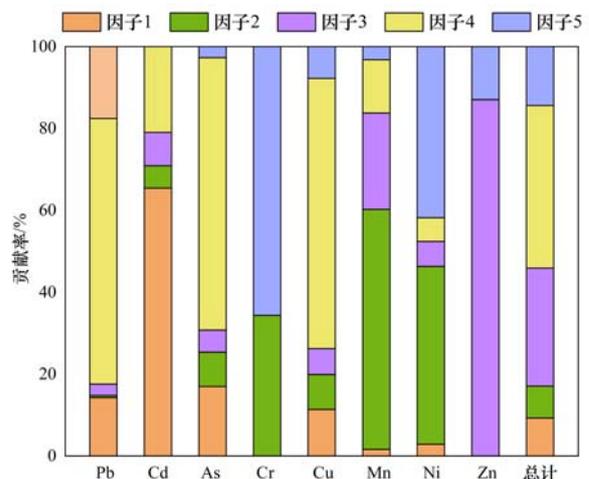


图 6 降尘重金属 PMF 因子贡献率

Fig. 6 Factor contribution from PMF of heavy metals in atmospheric deposition

凝蒸气等细颗粒和大量未经处理的冶炼废料等粗颗粒都会携带 Pb、As、Cu 等金属排放到大气环境中^[44,45]。所以,因子 4 可认为是以金属冶炼为主的工业污染源。在因子 5 中,Cr 和 Ni 的贡献率最大,分别为 65.7% 和 41.8%。这两种元素除了源于自然源之外,还可能来自刹车板及零件损耗,是二次扬尘的标志元素^[46,47],故因子 5 可以解释为二次扬尘源。

综上所述,研究区大气降尘中重金属的主要来源为:焚烧及燃煤源、自然源、交通污染源、金属冶炼为主的工业污染源和二次扬尘源,贡献率分别为 9.3%、7.8%、28.9%、39.7% 和 14.4%。

3 结论

(1)降尘中重金属 Pb、Cd、As、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Zn 含量平均值分别是河南省土壤背景值的 146.13、1221.56、27.93、2.36、22.68、1.45、1.99 和 38.36 倍。其中 As、Pb、Cd、Cu 和 Zn 的变异系数大,分别为 94.86%、93.75%、93.70%、93.36% 和 49.81%,各功能区间分布不均匀,受人为污染严重。

(2)降尘重金属含量除 Mn 外,均具有明显的季节变化趋势,其中 Pb、Cd、As、Cr、Cu 和 Zn 均在秋季最高,Ni 在夏季最高。此外,Pb、Cd、As、Cu 和 Zn 的空间分布差异显著,其中 Pb、Cd、As 和 Cu 的分布规律类似,高值区主要分布在工业区;Zn 的高值区主要分布于居民混合区。

(3)地累积指数结果表明,研究区以 Cd 和 Pb 污染为主,Zn、Cu 和 As 次之。手-口摄食途径是降尘重金属非致癌风险最主要暴露途径,对儿童的非致癌风险大于成人,以 Pb 和 As 的风险最大。各功能区重金属经呼吸途径的总致癌风险均在风险阈值内,不具有致癌风险。

(4)PMF 模型源解析结果表明,降尘中重金属的主要来源及贡献率为:焚烧及燃煤源(9.3%)、自然源(7.8%)、交通污染源(28.9%)、金属冶炼为主的工业污染源(39.7%)和二次扬尘源(14.4%)。为减轻该铅锌冶炼城市重金属污染,应重点加强管控工业污染源产生的 Pb、Cd 污染,重视交通污染源的影响。

参考文献:

[1] 黄文,王胜利.兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源[J].环境科学,2022,43(2):597-607.
Huang W, Wang S L. Distribution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric deposition during heating and non-heating period in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 597-607.

[2] Abuduwailil J, Zhang Z Y, Jiang F Q. Evaluation of the pollution and human health risks posed by heavy metals in the atmospheric dust in Ebinur Basin in Northwest China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(18): 14018-14031.

[3] 李萍,薛粟尹,王胜利,等.兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评估[J].环境科学,2014,35(3):1021-1028.
Li P, Xue S Y, Wang S L, et al. Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1021-1028.

[4] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(2): 951-972.

[5] Gope M, Mastro R E, George J, et al. Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 138: 231-241.

[6] Qiu K Y, Xing W Q, Scheckel K G, et al. Temporal and seasonal variations of As, Cd and Pb atmospheric deposition flux in the vicinity of lead smelters in Jiyuan, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(1): 170-179.

[7] Li Y, Zhou S L, Jia Z Y, et al. Temporal and spatial distributions and sources of heavy metals in atmospheric deposition in western Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 284, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117465.

[8] Chen L, Zhou S L, Wu S H, et al. Concentration, fluxes, risks, and sources of heavy metals in atmospheric deposition in the Lihe River watershed, Taihu region, eastern China [J]. Environmental Pollution, 2019, 255, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113301.

[9] Castillo S, De La Rosa J D, De La Campa A M S, et al. Contribution of mine wastes to atmospheric metal deposition in the surrounding area of an abandoned heavily polluted mining district (Rio Tinto mines, Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2013, 449: 363-372.

[10] 杨新明,钟雅琪,李国锋,等.典型工业城市大气降尘中重金属分布特征及其来源解析——以济南市为例[J].环境化学,2022,41(1):94-103.
Yang X M, Zhong Y Q, Li G F, et al. Distribution characteristic and source apportionment of heavy metals in atmospheric dust in a typical industrial city - A case study of Jinan [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1): 94-103.

[11] Yan Y, Chi H F, Liu J R, et al. Provenance and bioaccessibility of rare earth elements in atmospheric particles in areas impacted by the optoelectronic industry [J]. Environmental Pollution, 2020, 263, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114349.

[12] Tan J H, Duan J C, Chai F H, et al. Source apportionment of size segregated fine/ultrafine particle by PMF in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2014, 139: 90-100.

[13] Wei X, Gao B, Wang P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112: 186-192.

[14] Huang H, Jiang Y, Xu X Y, et al. In vitro bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in atmospheric particulate matters from three different functional areas of Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610-611: 546-554.

[15] Liu E F, Wang X Y, Liu H J, et al. Chemical speciation,

- pollution and ecological risk of toxic metals in readily washed off road dust in a megacity (Nanjing), China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **173**: 381-392.
- [16] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3118-3125.
Tian C H, Yang R Z, Yilihamu G L Z R, *et al.* Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3118-3125.
- [17] 刘杰, 高敏, 梁俊宁, 等. 陕西省某工业园区春季大气降尘重金属污染特征及评价[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(7): 1195-1203.
Liu J, Gao M, Liang J N, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal pollution in spring atmospheric dust of an industrial park in Shaanxi Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(7): 1195-1203.
- [18] Cai L M, Wang Q S, Luo J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for children near a large Cu-smelter in central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 725-733.
- [19] Li L P, Zhang Y Q, Ippolito J A, *et al.* Lead smelting effects heavy metal concentrations in soils, wheat, and potentially humans [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113641.
- [20] Xing W Q, Zhao Q, Scheckel K G, *et al.* Inhalation bioaccessibility of Cd, Cu, Pb and Zn and speciation of Pb in particulate matter fractions from areas with different pollution characteristics in Henan Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **175**: 192-200.
- [21] Weerasundara L, Magana-Arachchi D N, Ziyath A M, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in atmospheric deposition in a congested city environment in a developing country: Kandy City, Sri Lanka [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **220**: 198-206.
- [22] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around tongshan mining area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [23] 舒媛媛, 柏荣耀, 石俊豪, 等. 孝感市开放源扬尘重金属污染特征、来源及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2022, **41**(2): 499-510.
Shu Y Y, Bai R Y, Shi J H, *et al.* Pollution characteristics, sources and health risk assessment of heavy metals in open-source dusts in Xiaogan City [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(2): 499-510.
- [24] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
Li R Z, Zhou A J, Tong F, *et al.* Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [25] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2002.
- [26] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [27] US EPA. Risk assessment guidance for superfund-Volume 1-Human health evaluation manual (Part A). Interim report (Final) [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [28] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [29] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. 基于 PMF 模型及地统计法的乐安河中上游地区土壤重金属来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(6): 984-992.
Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal in the middle and upper reaches of Le'an river based on PMF model and geostatistics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 984-992.
- [30] 唐雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM_{2.5} 污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
Tuo X, Yang L X, Zhang W, *et al.* Characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [31] GB15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
GB15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].
- [32] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 1361-1369.
- [33] Huang S S, Tu J, Liu H Y, *et al.* Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(36): 5781-5790.
- [34] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值 [J]. *河南农业*, 1998, (10): 29.
- [35] De Miguel E, Llamas J F, Chacón E, *et al.* Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(17): 2733-2740.
- [36] Trujillo-González J M, Torres-Mora M A, Keesstra S, *et al.* Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **553**: 636-642.
- [37] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [38] Jin Y L, O'connor D, Ok Y S, *et al.* Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis [J]. *Environment International*, 2019, **124**: 320-328.
- [39] 刘玥, 郭文强, 武晔秋. 基于 PMF 模型的大同市城区公园地表灰尘中重金属污染评价及来源解析 [J]. *环境化学*, 2022, **41**(5): 1616-1628.
Liu Y, Guo W Q, Wu Y Q. Pollution assessment and source analysis of surface dust heavy metals in parks of Datong city based on Positive matrix factorization model [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(5): 1616-1628.
- [40] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4054-4060.
Zhou X M, Zheng N J, Li Y H, *et al.* Chemical characteristics and sources of heavy metals in fine particles in Beijing in 2011-2012 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4054-4060.

- [41] Kelepertzis E. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean; Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece[J]. *Geoderma*, 2014, **221-222**: 82-90.
- [42] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [43] Zannoni D, Valotto G, Visin F, *et al.* Sources and distribution of tracer elements in road dust: the Venice mainland case of study [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **166**: 64-72.
- [44] Du P, Xie Y F, Wang S J, *et al.* Potential sources of and ecological risks from heavy metals in agricultural soils, Daye City, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(5): 3498-3507.
- [45] Wang H Z, Cai L M, Wang Q S, *et al.* A comprehensive exploration of risk assessment and source quantification of potentially toxic elements in road dust: A case study from a large Cu smelter in central China[J]. *CATENA*, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104930.
- [46] 开建荣, 王彩艳, 牛艳, 等. 银川市大气沉降元素分布特征及来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(12): 96-103. Kai J R, Wang C Y, Niu Y, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of atmospheric fallout elements in Yinchuan City[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(12): 96-103.
- [47] 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 等. 扬州市PM_{2.5}中重金属来源及潜在健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 540-547. Dong S H, Xie Y, Huangfu Y Q, *et al.* Source apportionment and health risk quantification of heavy metals in PM_{2.5} in Yangzhou, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 540-547.



CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taiapu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)